

УДК 612.85.016

Число в двоичном коде как возможный способ запоминания информации о частоте звукового сигнала в слуховой системе человека

М.А. Стефанович

Инженер по радиоизмерительной технике, Санкт-Петербург
marg.stefanovich@yandex.ru

Аннотация. При восприятии звукового сигнала рецепторный потенциал (РП) увеличивается в группе внутренних волосковых клеток (ВВК). Слуховая система запоминает информацию о частоте звука по порядковому номеру ВВК (N_0), которая находится в середине общей группы клеток с повышенным РП. Например, при $F = 1000$ Гц $N_0 = 1240$. Информация о РП в ВВК преобразуется в плотность импульсации слуховых нейронов, которые расположены упорядоченно на 1-ой проекции частотной шкалы улитки (ПЧШУ) в АВЯ. Известно, что многие нейроны функционируют как логическая схема "И"; что информация о плотности импульсации слуховых нейронов на ПЧШУ в АВЯ передается к следующей проекции ЧШУ по нескольким параллельным каналам; что ансамбли нейронов можно рассматривать в качестве основного способа кодирования и передачи информации. В работе рассматривается возможный способ передачи информации о плотности импульсации любого слухового нейрона с порядковыми номерами от 1 до 3520 по ограниченному числу каналов связи с учетом известных характеристик нейронов разного типа. Приводится схема возможного соединения нейронов с возбуждающими и тормозными входами для запоминания порядковых номеров нейронов в двоичном коде. В мире начинаются научно-исследовательские работы по созданию интерфейса мозг-компьютер. Изучаются способы введения микроэлектродов в разные отделы мозга. Определение функции исследуемого нейрона в алгоритме обработки информации становится актуальной задачей сегодняшнего дня.

Ключевые слова: слуховая система, слышимая высота, проекции слуховых нейронов

Number in the binary code as possible mode of storing (memorizing) of information about frequency of sound signal in human auditory system

M.A. Stefanovich

Sankt-Petersburg, marg.stefanovich@yandex.ru

Abstract. At sound signal perception the Receptor Potential (RP) increases in the group of inner hair cells (IHC). The auditory system stores the information on the sound frequency based on the IHC order number (N_0), which is in the middle of the general group of cells with the increased RP. The auditory system perceives changes of frequency when N_0 number is changed by 6 units. The information on the RP in the IHC is converted into rate intensity of auditory neurons, which are orderly located on the 1-st projection of cochlea frequency scale (PCFS). It is known that many neurons function as the "I" logical scheme, that neuron sets can be regarded as the main mode of data encoding and transmission of the information. The paper describes the possible method of transmitting of information on the rate intensity of any auditory neuron with N_0 ranging from 1 to 3520 via the limited number of communication channels, considering the known characteristics of neurons of different types. The paper contains the scheme of possible connection of neurons with exciting and inhibitory inputs for storing order numbers of neurons N_0 in the binary code.

Keywords: auditory system, audible pitch, projections of auditory neurons

Введение

В блоке долговременной памяти человека хранится огромный объем информации. Слуховая система изучена более подробно, чем другие сенсорные системы. Человек слышит тональный звуковой сигнал и запоминает слышимую высоту и слышимую громкость. Затем он может воспроизвести голосом услышанный звук. В этой процедуре слуховая система фактически работает как измерительный прибор: измеряет и запоминает частоту и интенсивность в специфических единицах измерения с единственной целью – опознавания подобного сигнала при последующем предъявлении. Слуховая система ничего не знает о "герцах" и "децибелах". В комплексе элементов внутреннего уха информация о частоте преобразуется в увеличение рецепторного потенциала (РП) в группе внутренних волосковых клеток (ВВК), расположенных симметрично относительно точки основной мембраны улитки (ОМ) с наибольшей амплитудой поперечных колебаний. Эта точка называется "Точка главного возбуждения мембраны улитки (ТГВМ)". Линейная координата ТГВМ относительно вершины улитки зависит от частоты слышимого тона и не зависит от интенсивности звукового сигнала. При восприятии тонального звукового сигнала слышимая высота в условных единицах "мел" прямо пропорциональна расстоянию от ТГВМ до вершины улитки (или линейной координате ТГВМ относительно вершины улитки), измеренному в "мм" или по порядковому номеру ВВК в ТГВМ (Цвикер, Фельдкеллер 1971, Стефанович 2012). Проекция частотной шкалы улитки (ПЧШУ) многократно повторяется во всех высших отделах слуховой системы.

В научной литературе по слуховой системе не рассматриваются возможные способы трансляции информации о величине линейной координаты ТГВМ от 1-ой ПЧШУ до коры мозга и запоминания этой информации в блоке долговременной памяти (БДП). Изучение вариантов возможного алгоритма запоминания информации и, соответственно, распознавания запомненной информации по исследованию импульсации в определенных группах нейронов сегодня становится актуальной задачей. В нейрофизиологических экспериментах изучаются режимы стимуляции отдельных нейронов при подключении внешних электродов. Однако если автор эксперимента не представляет себе, какие функции может выполнять данный нейрон в цепочке последовательных преобразований сенсорного сигнала от рецепторной клетки до БДП, полученные результаты не слишком информативны.

Другим поводом для изучения функций слуховых нейронов на проекциях является тот факт, что проекции других сенсорных рецепторов организованы по такому же принципу. На проекциях ЧШУ слуховые нейроны расположены линейно и имеют одну координату по оси X. На проекциях зрительной, вкусовой и обонятельной систем нейроны, иннервирующие сенсорные рецепторы, упорядоченно расположены на плоскости. Группы сенсорных нейронов, иннервирующие рецепторные клетки с повышенным РП, расположены на проекциях в определенном для каждого вида стимула месте. Качество и интенсивность стимула все сенсорные системы запоминают по координатам сенсорных нейронов с наибольшей плотностью импульсации. Положение и порядковый номер каждого нейрона на плоскости проекции определяются координатами по осям X и Y.

1. Особенности восприятия тонального звукового сигнала

На рис. 1 представлена "Зависимость местоположения максимума поперечных колебаний основной мембраны улитки (ТГВМ) от частоты возбуждающего тона" (Цвикер, Фельдкеллер 1971). Этот график был построен на основании результатов физиологических экспериментов по изучению частотной характеристики улитки человека и морской свинки. Экспериментально установлено, что частотные характеристики комплекса элементов внутреннего уха морской свинки и человека совершенно одинаковые (Steinberg 1937, Stevens 1935). График зависимости линейной координаты ТГВМ от частоты тонального сигнала одинаков для всех людей с нормальным слухом (Вурма и др. 2006). При ухудшении слуха

форма кривой изменяется, уменьшается наклон линии в диапазоне тех частот, где смещаются пороги слышимости. По этой причине ухудшается частотная разрешающая способность слуха (ЧРСС), что проявляется как ухудшение качества понимания речи. На рис. 2 показано расположение внутренних волосковых клеток (ВВК) и наружных волосковых клеток (НВК) относительно основной мембраны улитки (ОМ). ВВК расположены равномерно в один ряд вдоль ОМ. Линейно, на одинаковом расстоянии одна от другой расположенные ВВК можно рассматривать как деления шкалы измерительного прибора. Для нейронной сети единицей измерения и запоминания величины линейной координаты является порядковый номер ВВК, расположенной в ТГВМ.

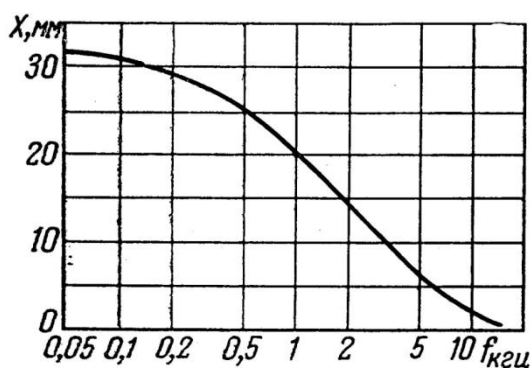


Рис. 1. Зависимость местоположения максимума поперечных колебаний основной мембраны улитки от частоты возбуждающего тона (Цвикер, Фельдкеллер 1971, рис. 33.4). По оси абсцисс частота тона в "кГц", по оси ординат – расстояние от основания улитки в "мм"

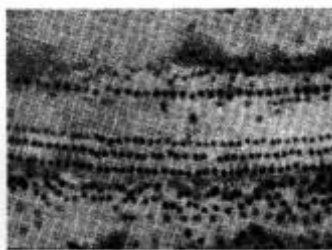


Рис. 2. Вид кортиева органа внутреннего уха морской свинки (по Нейберту) (Фельдкеллер, Цвикер 1967, рис. 32.3)

Частотная шкала слуха человека разделяется на 24 частотных канала (ЧК). Каждый ЧК состоит из 146-ти ВВК, которые расположены вдоль отрезка основной мембраны улитки длиной 1,3 мм. Цвикер и Фельдкеллер экспериментально измерили ширину всех ЧК и указали в Таблице 27.1 (Цвикер, Фельдкеллер 1971) центральные частоты для каждого ЧК. В середине ЧК1 находится ТГВМ для частоты 50 Гц. Для частоты 50 Гц линейная координата ТГВМ расположена на расстоянии 0,65 мм от вершины улитки, порядковый номер ВВК в ТГВМ $N_0 = 73$. Линейную координату ТГВМ относительно вершины улитки " $L_{арех}$ " для центральной частоты любого ЧК можно рассчитать в "мм" и по порядковому номеру ВВК в ТГВМ (N_0): $L_{арех} = [0,65 + 1,3 \times (N_{чк} - 1)]$ мм; $N_0 = 73 + 146 \times (N_{чк} - 1)$. Здесь $L_{арех}$ – расстояние от вершины улитки, N_0 – порядковый номер ВВК в ТГВМ, $N_{чк}$ – порядковый номер частотного канала.

ТАБЛИЦА 27.1

Номер пп.	$f_{м.зч}$	$\Delta f_{г.зч}$	$10 \lg \frac{\Delta f_{г.зч}}{f_{г.зч}}, дБ$	$f_{г.зч}$	Номер пп.	$f_{м.зч}$	$\Delta f_{г.зч}$	$10 \lg \frac{\Delta f_{г.зч}}{f_{г.зч}}, дБ$	$f_{г.зч}$
1	50	80	19	20	13	1850	280	25	1720
2	150	100	20	100	14	2150	320	25	2000
3	250	100	20	200	15	2500	380	26	2320
4	350	100	20	300	16	2900	450	27	2700
5	450	110	20	400	17	3400	550	27	3150
6	570	120	21	510	18	4000	700	28	3700
7	700	140	21	630	19	4800	900	29	4400
8	840	150	22	770	20	5800	1100	30	5300
9	1000	160	22	920	21	7000	1300	32	6400
10	1170	190	23	1080	22	8500	1800	32	7700
11	1370	210	23	1270	23	10500	2500	34	9500
12	1600	240	24	1480	24	13500	3500	35	12000
									15500

Рис. 3. Центральные и граничные частоты для 24-х частотных каналов

Таблица 1

Линейные координаты ТГВМ для нескольких частот, измеренные относительно основания улитки L_{base} по графику рис. 1 с помощью цифровой линейки, и линейные координаты ТГВМ для этих же частот относительно вершины улитки L_{apex} , рассчитанные по ширине частотных каналов (Цвикер, Фельдкеллер 1971, Табл. 27.1)

F, кГц	0,1	0,2	0,5	1	2	5	8	10	Примечание
L_{base} , мм	30,5	28,9	24,9	20,0	14,0	5,8	2,8	1,8	по рис. 1
L_{apex} , мм	1,3	2,6	6,4	11,1	16,9	23,7	27,0	28,2	по рис. 3
$(L_{base} + L_{apex})$, мм	31,8	31,5	31,3	31,1	30,9	29,5	29,8	30,0	$L_{bm} = L_{base} + L_{apex}$

Сумма числовых значений линейных координат ТГВМ для каждой частоты относительно основания улитки и относительно вершины улитки ($L_{base} + L_{apex}$) равна общей длине основной мембраны L_{bm} от точки расположения ТГВМ для начальной частоты ЧК1 до основания улитки. Сумма линейных координат ТГВМ относительно вершины улитки и относительно основания улитки в диапазоне частот от 100 Гц до 10 кГц получается практически одинаковой (наибольшее расхождение результатов составляет $\pm 4\%$ от средней величины 30,8 мм). Совпадение результатов измерения линейных координат ТГВМ в экспериментах по рис. 1 и рассчитанных по результатам измерения ширины частотных каналов можно рассматривать как доказательство достоверности данных, полученных авторами экспериментов. Особое восхищение вызывает тот факт, что эксперименты проводились в совершенно разных условиях. Физиологические эксперименты проводились на "открытой улитке", иначе длину отрезка ОМ в "мм" измерить невозможно. Психоакустические эксперименты Цвикера и Фельдкеллера проводились на 30 лет позже, при активном участии испытуемых с нормальным слухом. Каждой частоте звукового сигнала соответствует точка на основной мембране улитки с наибольшей амплитудой поперечных колебаний относительно вершины улитки L_{apex} , линейная координата которой однозначно зависит от частоты слышимого тона в "Гц".

При восприятии тонального звукового сигнала средней интенсивности рецепторный потенциал (РП) увеличивается в группе из не менее чем 500 внутренних волосковых клеток. На рис. 4 показана группа ВВК с повышенным РП.

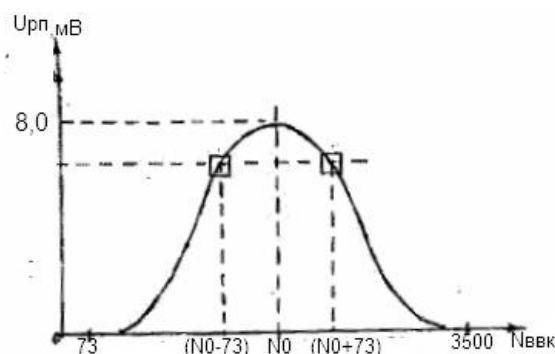


Рис. 4. Огибающая группы ВВК с повышенным РП. По оси абсцисс – порядковые номера ВВК; по оси ординат – рецепторный потенциал возбужденных ВВК; кривая линия – огибающая общей группы ВВК с повышенным РП

Рецепторный потенциал ВВК увеличивается до наибольшего значения примерно 8 мВ при интенсивности слышимого тона 70 дБ над порогом слышимости. При дальнейшем увеличении интенсивности количество ВВК с наибольшим РП постепенно увеличивается до 146-ти клеток, что является сигналом для включения болевого порога. Форма огибающей кривой изменяется до трапецевидной. При запоминании информации о частоте и громкости слышимого тона слуховая система человека анализирует степень возбуждения 146-ти ВВК, образующих один частотный канал (ЧК) (Цвикер, Фельдкеллер 1971). Каждую ВВК иннервируют несколько клеток спирального ганглия (КСГ) с разными порогами возбуждения, в которых РП преобразуется в поток импульсов. КСГ фактически работают как аналого-цифровой преобразователь. Суммарная плотность импульсации всех КСГ, иннервирующих одну ВВК, пропорциональна РП. С выходов КСГ импульсы передаются по волокнам слухового нерва (СН) в ККЯ к 1-ой проекции частотной шкалы улитки (ПЧШУ). Экспериментально определены числовые значения ощущений слышимой высоты и слышимой громкости. На рис. 5 показан график зависимости слышимой высоты $Z_{\text{мел}}$ от частоты тона $F, \text{Гц}$ (Цвикер, Фельдкеллер 1971, рис. 31.1).

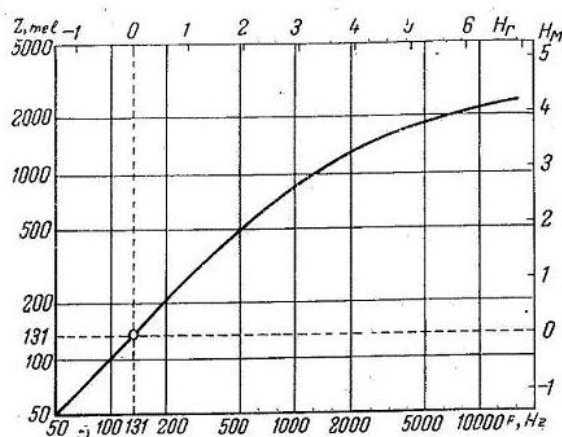


Рис. 5. Зависимость высоты тона $Z_{\text{мел}}$ от частоты $F, \text{Гц}$

Линейная координата ТГВМ прямо пропорциональна частоте тона $F, \text{Гц}$ в диапазоне частот до 500 Гц, пропорциональна логарифму изменения частоты в диапазоне от 1 кГц до 16 кГц. В диапазоне частот от 500 Гц до 1 кГц зависимость линейной координаты ТГВМ от частоты имеет переходный характер. В Таблице 2 указаны для нескольких частот слышимая высота $Z_{\text{мел}}$, порядковые номера ВВК в ТГВМ "N0" и отношение $K = Z/N0$.

Отношение слышимой высоты тона к порядковому номеру ВВК в ТГВМ

F, Гц	450	500	630	794	1000	1260	1587
Z, мел	450	500	624	734	850	1011	1159
N0	657	718	870	1047	1241	1453	1680
K	0,68	0,69	0,72	0,70	0,68	0,69	0,69
F, Гц	2000	2520	3174	4000	5040	6348	8000
Z, мел	1293	1451	1613	1750	1869	2003	2134
N0	1898	2117	2323	2540	2738	2916	3092
K	0,68	0,68	0,69	0,69	0,68	0,68	0,69

Отношение $K = Z / N0$ одинаково для диапазона частот от 100 Гц до 8000 Гц с точностью до 5 %. Это не может быть случайным совпадением, так как Цвикер и Фельдкеллер проводили два разных эксперимента в разное время и с разными испытуемыми. При восприятии тонального звукового сигнала слышимая высота действительно прямо пропорциональна порядковому номеру ВВК в ТГВМ.

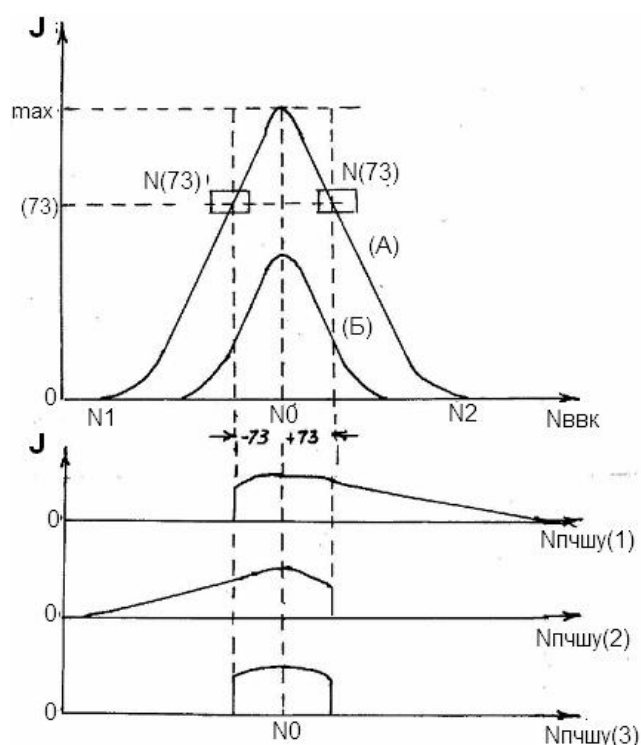


Рис. 6. Выделение группы из 146-ти слуховых нейронов, образующих частотный канал. По осям абсцисс – порядковые номера ВВК (N_{BVK}) и слуховых нейронов, которые иннервируют соответствующие ВВК; по оси ординат – плотность импульсации (J , имп./с) в относительных единицах для слуховых нейронов, образующих проекции ЧШУ. ($N1-N2$) – группа ВВК с повышенным РП при восприятии тонального сигнала с УЗД 70 дБ над порогом слышимости (А). $N0$ – порядковый номер ВВК, расположенной в ТГВМ. Между вертикальными пунктирными линиями по осям $N_{пчшу}(1)$, $N_{пчшу}(2)$ и $N_{пчшу}(3)$ находится по 73 нейрона. (Б) – форма кривой, огибающей группу возбужденных ВВК при среднем уровне интенсивности звукового сигнала

На рис. 6 показан возможный способ выделения 146-ти слуховых нейронов, образующих один частотный канал (Стефанович 2012). Слышимая громкость пропорциональна увеличению суммарного рецепторного потенциала 146-ти ВВК, расположенных симметрично относительно ТГВМ. Окончания волокон СН, которые

иннервируют одну ВВК, объединяются на синапсах одного суммирующего слухового нейрона (ССН) (Позин и др. 1978). Плотность импульсации ССН пропорциональна рецепторному потенциалу иннервируемой ВВК. Таким образом в АВЯ образуется 1-я проекция ЧШУ ($N_1—N_2—N_{ввк}$), показанная на рис. 6. Огибающая группы ССН с повышенной плотностью импульсации повторяет форму огибающей группы ВВК с повышенным РП. Особое значение имеют ВВК с порядковыми номерами (N_0-73) и (N_0+73). При изменении частоты звукового сигнала группа ВВК с повышенным РП смещается вдоль ОМ и плотность импульсации в нейронах (N_0-73) и (N_0+73) изменяется разнонаправленно. При изменении интенсивности сигнала плотность импульсации в нейронах (N_0-73)- N_0 -(N_0+73) изменяется однонаправленно. Любое изменение импульсации в нейронах (N_0-73) и (N_0+73) слуховая система воспринимает как сигнал для начала нового цикла измерений. Возможный способ выделения ССН с порядковым номером N_0 , иннервирующего ВВК в ТГВМ, и слуховых нейронов ССН с порядковыми номерами (N_0-73) и (N_0+73) может быть реализован с помощью трех вспомогательных групп упорядоченно расположенных нейронов на проекциях Нпчшу(1), Нпчшу(2) и Нпчшу(3) по принципу последовательного сравнения плотности импульсации на возбуждающем синапсе и тормозном синапсе. Если первым приходит импульс на возбуждающий синапс, то нейрон генерирует спайк. Если первым приходит импульс на тормозной синапс, то нейрон "молчит". Например, при восприятии тона с частотой 1000 Гц одновременно будут генерировать импульсы слуховые нейроны с порядковыми номерами от 1167 до 1313 на Нпчшу(3), что и составляет один частотный канал. При изменении частоты слышимого тона вся группа ССН с порядковыми номерами от (N_0-73) до (N_0+73) смещается вдоль проекции ЧШУ, и наибольшую плотность импульсации будет иметь ССН с другим порядковым номером N_0 . При изменении интенсивности слышимого тона соответственно изменяется плотность импульсации всех слуховых нейронов с порядковыми номерами от (N_0-73) до (N_0+73). При восприятии тонального звукового сигнала числовая информация о слышимой высоте и слышимой громкости соответствует плотности импульсации в слуховых нейронах с порядковыми номерами (N_0-73), N_0 и (N_0+73).

2. Трансляция информации о степени возбуждения слуховых нейронов из ККЯ в высшие отделы слуховой системы

На рис. 7 показана "Схема слуховых центров кошки, отражающая тонотопическую организацию характеристических частот нейронов" (ФСС 2003, рис. 66). В высших отделах слуховой системы имеется по несколько проекций ЧШУ. Количественная информация о частоте и интенсивности тонального звукового сигнала, преобразованная в увеличение плотности импульсации в 146-ти слуховых нейронах, передается от 1-й проекции ЧШУ в АВЯ к 40-му и 41-му слуховым полям в слуховой коре. Группы тонотопически расположенных нейронов, повторяющих проекцию ЧШУ, расположены во всех отделах слуховой системы от ККЯ до коры головного мозга. На рис. 8 показаны ЧПХ для двух слуховых нейронов мыши на уровне среднего мозга (Егорова и др. 2002). Нейрон 75 имеет ЧПХ V-образной формы и $ХЧ = 16,2$ кГц. Плотность импульсации увеличивается примерно от 20 имп. до 70 имп. при увеличении интенсивности звукового сигнала на 65 дБ выше порога слышимости. Нейрон 71 имеет ЧПХ замкнутой формы и $ХЧ = 30$ кГц. Плотность импульсации примерно 60 имп. в диапазоне частот от 29,2 кГц до 30,8 кГц. Информация о частоте слышимого тона содержится в порядковом номере нейрона, иннервирующего ВВК в ТГВМ. Зависимость линейной координаты от частоты сигнала для ТГВМ в слуховой системе мыши неизвестна, поэтому для нейрона Н75 определить слышимую высоту по данной характеристике невозможно. Относительно нейрона Н71 нельзя понять, какую функцию нейрон выполняет в алгоритме восприятия и запоминания информации о частоте или интенсивности звукового сигнала.

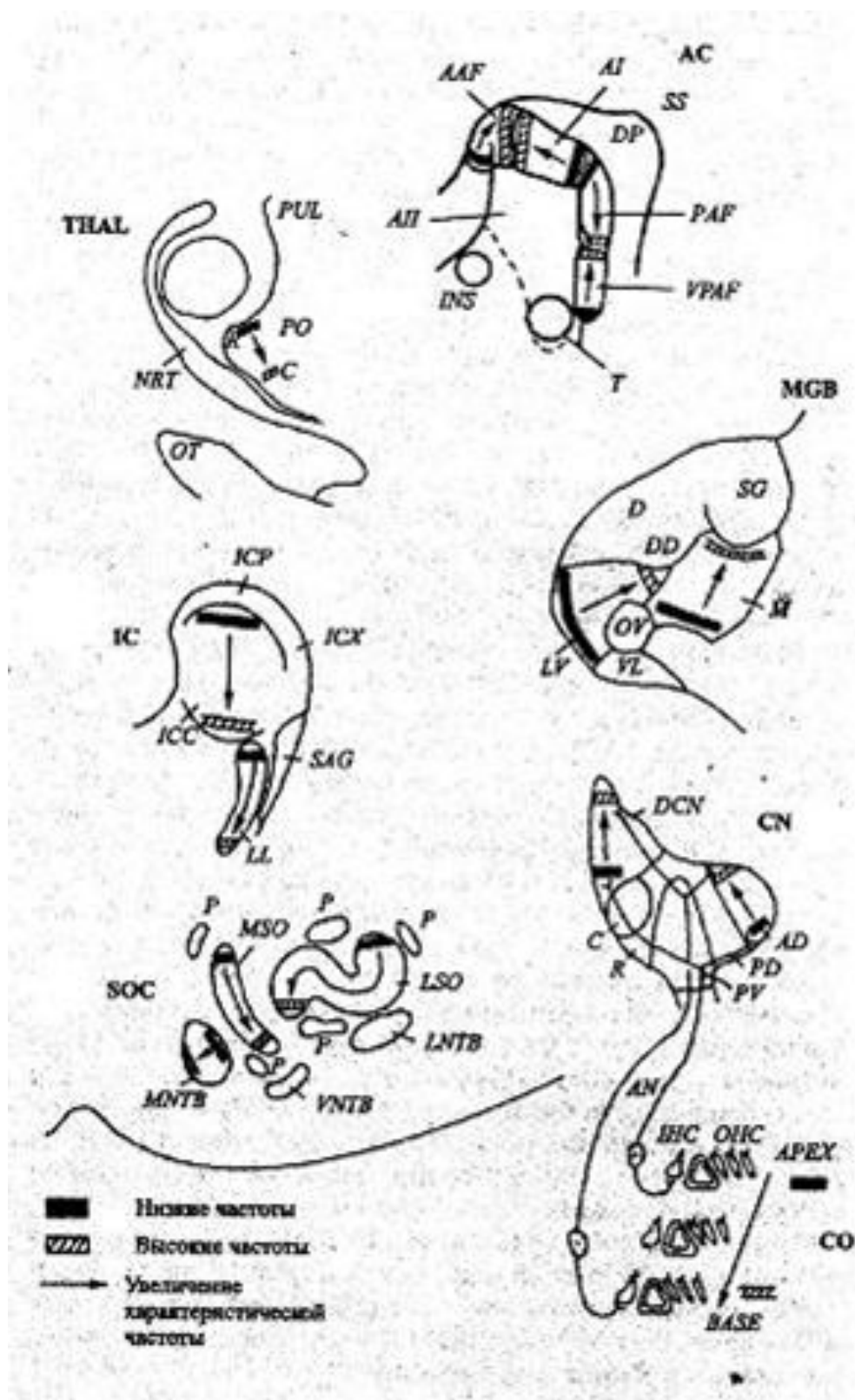
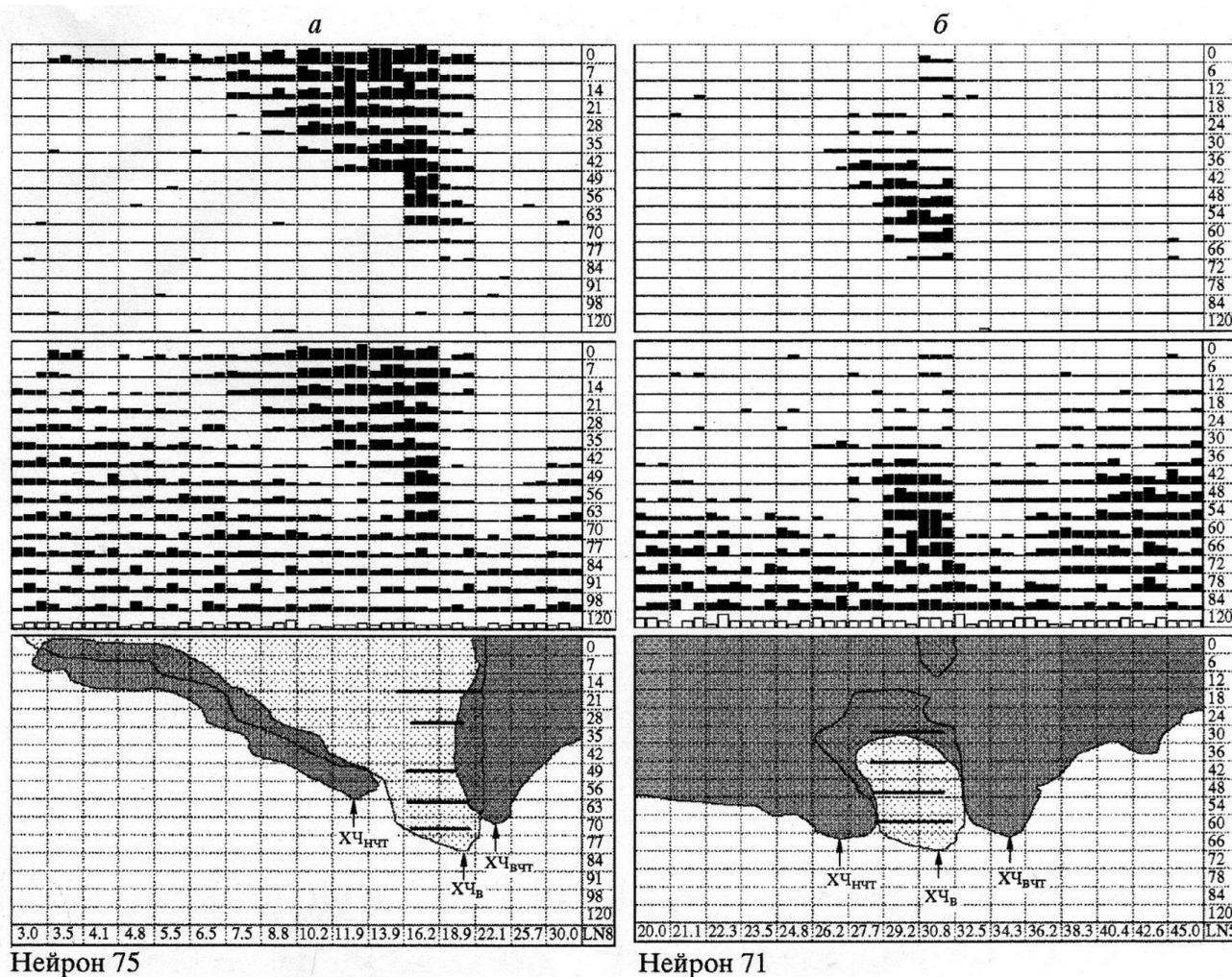


Рис. 7. Схема слуховых центров кошки, отражающая тонотопическую организацию характеристических частот нейронов. Здесь стрелки показывают направление, в котором происходит увеличение ХЧ. Заштрихованные участки – высокие частоты, черные участки – низкие частоты. CN – комплекс кохлеарных ядер, SOC – комплекс ядер верхней оливы, IC – задний холм, MGB – внутреннее коленчатое тело, THAL – таламус, AC – слуховая кора



Нейрон 75

Нейрон 71

Рис. 8. ЧПХ для 2-х нейронов на проекции ЧШУ на уровне среднего мозга мыши (Егорова и др. 2002). Диаграммы распределения возбуждающих и тормозных частотных входов и критических полос в рецептивном поле нейронов различных групп. А – первично-образный нейрон; б – тормозно-зависимый нейрон; 0 дБ соответствует 85 дБ УЗД. В верхней части рисунка – области возбуждающего ответа, полученные при картировании рецептивного поля нейрона одиночными тонами; в средней части рисунка – распределение возбуждающих и тормозных областей, полученное при картировании рецептивного поля двухтоновыми комплексами. В нижней части рисунка изображено соотношение частотных областей возбуждения (светло-серые) и торможения (серые) нейрона. Количество спайков, соответствующее столбцу минимальной величины, указано в нижнем правом углу нижнего рисунка. Жирные горизонтальные линии – критические полосы. $XЧ_{в}$ – возбуждающая характеристическая частота нейрона; $XЧ_{нчт}$ – низкочастотная возбуждающая частота нейрона; $XЧ_{вчт}$ – высокочастотная возбуждающая частота нейрона

При обсуждении возможного алгоритма функционирования слуховой системы необходимо учитывать известные особенности нейронов. В Таблице 3 приводятся цитаты из научных монографий с описанием некоторых характеристик нейронов, которые необходимо учитывать при составлении схемы возможного соединения разных нейронов для реализации процесса трансляции информации от выхода 1-ой ПЧШУ до входа блока долговременной памяти (БДП).

Таблица 3

Сведения о нейронах, которые учитываются при построении схемы трансляции информации по ограниченному числу каналов передачи

	Цитата: информация о нейронах	Толкование
	"В области аксонного холмика суммируются и реализуются эффекты сигналов, поступающих на периферию нейрона. Деполяризация возбудимой мембраны аксонного холмика должна достигнуть определенной величины, и тогда в этом месте возникнет возбуждение, следующее закону "все или ничего", т.е. аксон "разрядится". Чтобы это произошло, необходимо почти одновременное поступление к нейрону возбуждающих сигналов по определенному числу нервных отростков, именно в этом случае возбуждение передается на аксон" (Хамори 1987, с. 21).	Это точное описание лог. схемы "И", основного элемента цифровых микросхем.
	"Выходной пучок из ДЯ формируют нейроны с замкнутой формой пороговой кривой. У большинства нейронов нет временного воспроизведения несущей. Из ККЯ сигнал после обработки выходит по нескольким параллельным каналам" (Бибиков 1987, с. 174).	Прямого соединения нейронов с одинаковым Nввк на разных ПЧШУ нет.
	"Ни один нейрон не может пересылать никакой информации другим нейронам. Информация передается исключительно через возбуждение группы нейронов, входящих в соответствующий ансамбль. Д. Хебб предложил рассматривать ансамбль нейронов в качестве основного способа кодирования и передачи информации. Различные наборы возбужденных нейронов одного и того же ансамбля соответствуют разным параметрам стимула" (Данилова 1998, с. 31).	Это точное описание ячейки памяти для числа в двоичном коде.

Как можно соединить все 3500 тонотопически расположенных слуховых нейронов в ККЯ с такой же группой тонотопически расположенных слуховых нейронов на проекциях ЧШУ последовательно во всех отделах слуховой системы, если имеется всего лишь "несколько параллельных каналов"? Информация о порядковых номерах и степени возбуждения слуховых нейронов, которые запомнили слышимую высоту и слышимую громкость, после выключения звукового сигнала сохраняется в блоке долговременной памяти (БДП). На проекции ЧШУ одновременно может отображаться информация о параметрах только одного звукового сигнала. Так же, как и на проекции зрительного поля может реализовываться только один зрительный образ. При запоминании информации о звуковом сигнале или зрительном образе информация передается в БДП. При необходимости вспомнить мелодию или "лицо друга" включается обратный интерфейс от БДП к виртуальной проекции ЧШУ или проекции зрительного поля. Во вкусовой и обонятельной системе обратные виртуальные проекции рецепторов не образуются. Человек может сравнить вкус или запах с образцами, информация о которых хранится в БДП, но мысленно ощутить вкус или запах при отсутствии объекта восприятия человек не может.

3. Возможный способ передачи информации о степени возбуждения слуховых нейронов по ограниченному количеству линий связи

Информация о плотности импульсации нейронов с порядковыми номерами (N0–73) – N0 – (N0+73) транслируется от 1-ой проекции ЧШУ в АВЯ до блока долговременной памяти

в нейронной сети мозга. Из возможных способов организации трансляции информации наиболее оптимальным по затратам биоэнергии может быть разделение частотной шкалы улитки на 56 групп по 63 слуховых нейрона в каждой группе. Человек может одновременно различить 24 разных по высоте звуковых сигнала. Информация о высоте и громкости каждого отдельного сигнала запоминается по порядковым номерам и плотности импульсации трех слуховых нейронов с номерами (N0–73) – N0 – (N0+73). Максимальное количество слуховых нейронов, информацию о состоянии которых необходимо запомнить при одновременном восприятии 24-х разных по высоте звуков, равно 50. В группе из 63-х слуховых нейронов одновременно передается информация о состоянии только одного нейрона. Непосредственное соединение слуховых нейронов с одинаковыми порядковыми номерами на ПЧШУ в разных отделах слуховой системы в группе из 63-х нейронов может быть реализовано по 6-ти линиям передачи при кодировании порядкового номера нейрона в двоичной системе. В группе из 6-ти запоминающих нейронов (ЗН) можно в двоичном коде представить любое число от 1 до 63: $63 = (1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 32)$. Для примера на рис. 9 показано, как должны коммутироваться 3 линии передачи, чтобы реализовать возможность 7-ми разных соединений.

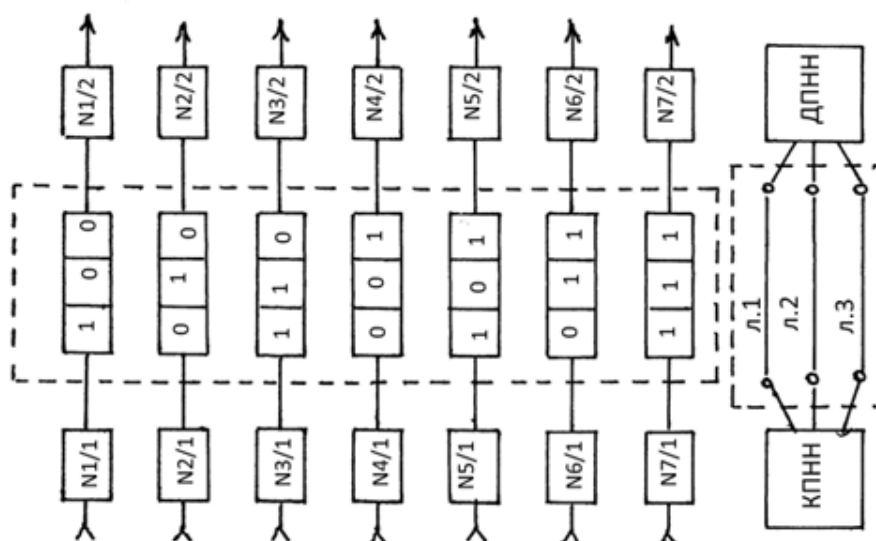


Рис. 9. Возможный способ кодирования порядковых номеров 7-ми нейронов для передачи информации по трем линиям связи. (N1/1 – N7/1) – слуховые нейроны со стороны передачи, (N1/2 – N7/2) – слуховые нейроны со стороны приема; КПНН – кодирование порядкового номера нейрона; ДПНН – декодирование порядкового номера нейрона; (л. 1, л. 2, л. 3) – линии передачи

Таблица 4

Коды управления коммутацией шести линий передачи для соединения 63-х слуховых нейронов с одинаковым порядковым номером, расположенных на разных ПЧШУ

N0	л. 1	л. 2	л. 3	л. 4	л. 5	л. 6
1	1	0	0	0	0	0
10	0	1	0	1	0	0
20	0	0	1	0	1	0
30	0	1	1	1	1	0
40	0	0	0	1	0	1
50	0	1	0	0	1	1
60	0	0	1	1	1	1
63	1	1	1	1	1	1

В Таблице 4 для примера показаны несколько вариантов использования шести линий передачи для непосредственного соединения нейронов с одинаковыми номерами от $N0 = 1$ до $N0 = 63$. В блоках кодирования (КПНН) и декодирования (ДПНН) порядкового номера слухового нейрона необходимо использовать специальные нейроны для выполнения нескольких специфических операций. Одиночные нейроны могут выполнять такие же функции, как цифровые микросхемы. Подобные операции выполняют цифровые микросхемы "И", которые широко применяются в компьютерах. Это означает, что из нейронов можно составлять такие же электрические схемы, как и для компьютерных блоков. В Таблице 5 показаны обозначения нейронов для выполнения необходимых операций при кодировании и декодировании порядкового номера слуховых нейронов.

Таблица 5

Необходимые функции нейронов для передачи информации по ограниченному числу каналов связи

Обозначение	Функция
НГ – нейрон генераторный	Генерация импульсов: эквивалент лог.1
НК – нейрон кодирующий	Входной сигнал для КПНН
НД(0) – нейрон декодирующий для лог.0	Определяет количество "0" на входе ДПНН
НД(1) – нейрон декодирующий для лог.1	Определяет количество "1" на входе ДПНН
НЛ – нейрон линейный	Вход одиночной линии передачи

На рис. 9 показана возможная схема соединения нейронов для трансляции информации с выхода проекций ЧШУ по ограниченному количеству каналов связи.

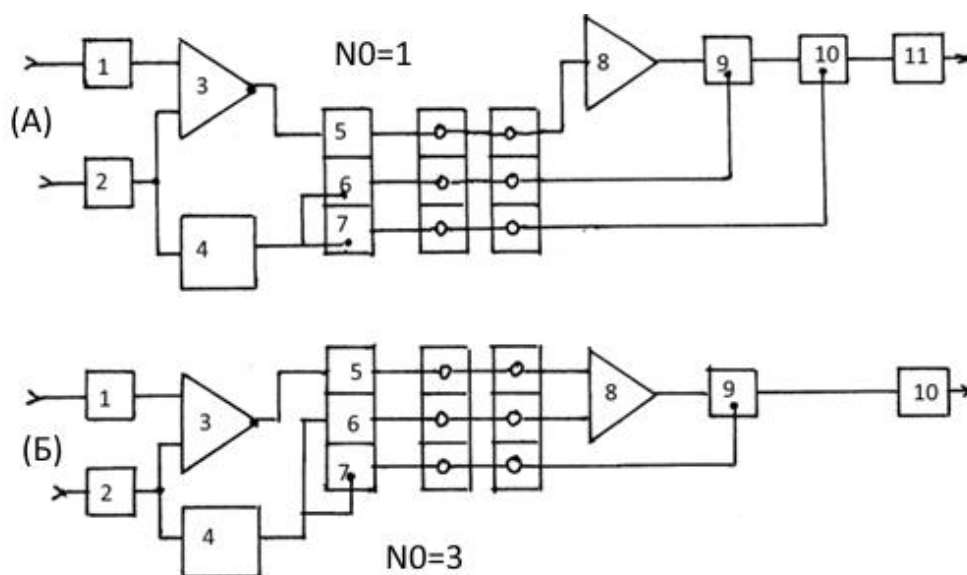


Рис. 9. Схема коммутирования каналов связи для передачи информации от слуховых нейронов с порядковыми номерами $N0 = 1$ (А) и $N0 = 3$ (Б). 1 – слуховой нейрон СН (выход ПЧШУ1), 2 – нейрон генераторный НГ, 3 – нейрон кодирующий НК1, 4 – нейрон кодирующий НК2, 5, 6, 7 – нейроны линейные (НЛ1, НЛ2, НЛ3), 8 – нейрон декодирующий НД(1); схема (А): сигнал "лог.1" подается на тормозные входы НЛ2 и НЛ3; 9, 10 – нейроны декодирующие НД(0), 11 – слуховой нейрон (вход ПЧШУ2); схема (Б): сигнал "лог.1" подается на возб. вход НЛ2 и торм. вход НЛ3; 9 – нейрон декодирующий НД(0), 10 – слуховой нейрон (вход ПЧШУ2)

Если $N0 = 1$, то нейрон ДПНН должен иметь один возбуждающий вход (по числу "1" в коде) и два последовательно включенных нейрона НД(0) (по числу "0" в коде). Если $N0 = 3$, то нейрон ДПНН должен иметь два возбуждающих входа (по числу "1" в коде) и один нейрон НД(0) (по числу "0" в коде). Сумма количества возбуждающих входов на нейроне НД(1) и количества нейронов НД(0) должна быть постоянной и равной количеству линий передачи.

Нейрон генераторный (НГ) переходит в режим самовозбуждения при поступлении сигнала на возбуждающий синапс. Это может быть одиночный нейрон с обратными коллатеральными или пейсмейкерная схема из нескольких нейронов. Генерация импульсов прекращается при поступлении импульса на тормозной вход нейрона. НГ имеет замкнутую форму ЧПХ. На рис. 8б подобную форму ЧПХ имеет нейрон 71. После выделения на 1-ой проекции ЧШУ слуховых нейронов с порядковыми номерами ($N0-73$) – $N0$ – ($N0+73$) на вход НГ поступает импульсный сигнал как команда к подготовке соединения для трансляции информации о степени возбуждения данных нейронов к следующей проекции ЧШУ. По этой команде НГ переходит в режим самовозбуждения. Принцип работы схемы коммутации каналов связи для соединения слуховых нейронов с одинаковыми порядковыми номерами на разных ПЧШУ объясняется в Таблице 6.

Таблица 6

Последовательность необходимых операций для трансляции информации по каналу связи с ограниченным количеством линий

Действие	Результат
Выделение нейрона с номером $N0=3$ на ПЧШУ1	Импульс на вход НГ
НГ: генерация импульсов "лог.1"	Сигнал "1"
На входах НК1: сигнал от $N3/1$ и "1" от НГ; аксон от НК2 передает "1" на возбуждающий вход НЛ2 и на тормозной вход НЛ3	НЛ1: 1 НЛ2: 1 НЛ3: 0
Аксон НК1 через НЛ1 соединяется с НД(1) / вх.1, на НД(1) / вх.2 – "1". На тормозном входе НД(0) сигнала нет	Декодирование $N0=3$
Цепь: $N3/1$ –НК1–НД(1)–НД(0)– $N3/2$ замкнута	Передача сигнала

Нейрон кодирующий (НК1) имеет два возбуждающих синапса. "Вх.1" соединен с аксоном слухового нейрона на выходе ПЧШУ1, информация от которого должна передаваться к следующей ПЧШУ2. Вход "Вх.2" соединен с аксоном НГ. Аксон НК1 соединяется с синапсом нейрона линейного (НЛ) на входе линии передачи с кодом "1". Нейрон кодирующий (НК2) передает сигнал "1" на возбуждающий вход нейрона НЛ2 и сигнал "1" на тормозной вход НЛ3. Таким образом включается код сигнала передачи для $N0 = 3$: 1-1-0. Общее количество выходов нейронов НК1 и НК2 должно быть равно количеству линий передачи. На приемном конце нейрон декодирующий НД(1) должен иметь столько возбуждающих синапсов, сколько линий передают "1". Аксон НД(1) соединяется со входом декодирующего нейрона НД(0). Тормозные входы нейронов НД(0) соединяются с выходами линий, по которым передается "0". Сумма возбуждающих входов нейрона НД(1) и последовательно включенных нейронов НД(0) должна быть равна общему количеству линий передачи. Импульсный сигнал от аксона слухового нейрона $N3/1$ на входе канала связи пройдет до синапса нейрона $N3/2$ на выходе только в том случае, если количество нулей и единиц будет соответствовать коду на входе линий передачи. Если количество единиц на входе НД(1) будет меньше запрограммированного, то сигнал не пройдет на выход НД1. Если на тормозной вход нейронов НД(0) придет "неожиданная 1", то сигнал не пройдет через тормозной нейрон.

Для каждой линии со стороны входа необходимы нейроны с V-образной формой ЧПХ: СН1/1, НК1 и НЛ1. Нейроны НГ, НК2, НЛ2 и НЛ3 должны иметь замкнутую форму ЧПХ.

Если сигналы передаются по шести линиям, то количество нейронов с замкнутой формой ЧПХ увеличивается до семи (добавляются нейроны НЛ4, НЛ5 и НЛ6). Это совпадает с известным фактом (Бибииков 1987), что на выходе из ДЯ количество нейронов с замкнутой формой ЧПХ больше, чем нейронов с V-образной ЧПХ.

Двоичный код для управления режимом коммутации линий для передачи информации между проекциями ЧШУ совпадает с двоичным кодом порядкового номера слухового нейрона. Этот код транслируется и в блок долговременной памяти (БДП). Слуховая система человека ощущает изменение частоты звукового сигнала при изменении порядкового номера ВВК в ТГВМ на 6 единиц при длительности тональной посылки 200 мс (Стефанович 2012). Потоки импульсов в слуховых нейронах с порядковыми номерами (N0–73) – N0 – (N0+73) через последовательное соединение всех проекций ЧШУ поступают на вход БДП через счетчики импульсов. Число в двоичном коде, пропорциональное количеству импульсов за определенный промежуток времени, слуховая система запоминает как информацию о слышимой громкости. Информация проходит последовательно через все отделы сенсорных систем и может храниться в памяти долгие годы. В нейрофизиологических экспериментах через электроды регистрируются импульсные сигналы в отдельных нейронах. Информативность результатов подобных экспериментов существенно повысится, если будет возможность определить по специальной программе функцию исследуемого нейрона в выполнении определенной задачи.

Заключение

Эксперименты Цвикера и Фельдкеллера по исследованию слуховых ощущений человека с нормальным слухом позволили определить количественные характеристики слышимой высоты и слышимой громкости при восприятии тональных звуковых сигналов. Комплексный анализ результатов этих экспериментов однозначно доказывает, что слуховая система запоминает информацию о частоте тона по порядковому номеру ВВК с наибольшим рецепторным потенциалом и информацию о слышимой громкости по плотности импульсации слуховых нейронов, которые иннервируют ВВК с порядковыми номерами (N0–73), N0 и (N0+73). Этой информации совершенно достаточно для того, чтобы опознать подобный сигнал при повторном предъявлении. Известные характеристики нейронов разных типов позволяют предположить возможность кодирования числовых значений слышимой высоты и слышимой громкости в двоичном коде.

Нейрофизиологи в экспериментах исследуют импульсацию отдельных сенсорных нейронов через введенные электроды. Модели обработки сигналов на проекциях сенсорных систем необходимы для того, чтобы попытаться понять функцию исследуемого нейрона в процессе передачи и запоминания информации для повышения информативности результатов нейрофизиологических экспериментов. Сейчас изучение работы мозга проводится в основном методом электроэнцефалографии или методом МРТ. Эти методы полезны для изучения процессов, в которых участвует одновременно большое количество нейронов. В процессе обработки количественной информации о параметрах сенсорных стимулов изменяется импульсация небольшого количества сенсорных нейронов, которое можно контролировать только через электроды. В программу проведения нейрофизиологических экспериментов по изучению импульсации отдельных нейронов должен входить вопрос об определении функции данного нейрона. В мире начинаются научно-исследовательские работы по созданию интерфейса мозг–компьютер. Изучаются способы введения микроэлектродов в разные отделы мозга. Определение места и функции исследуемого нейрона в алгоритме обработки информации становится актуальной задачей сегодняшнего дня.

Литература

- Цвикер Э., Фельдкеллер Р. 1971. Ухо как приемник информации. Москва: Связь.
- Стефанович М.А. 2012. Запоминание информации о частоте звукового сигнала в слуховой системе человека // Материалы XVI Международной конференции по нейрокибернетике 24–28 сентября 2012. Том 1. Ростов-на Дону: ЮФУ. – С. 214-217.
- Steinberg J.C. 1937. Position of stimulation in the cochlea by pure tones // JASA 8. – P. 176-181.
- Stevens S.S., Davis H., Lurie M.H. 1935. The localization of pitch perception on the basilar membrane // J. Gen. Psychol. 13, 297.
- Вурма А., Росс Я., Огородникова Е.А. 2006. Восприятие вокальных музыкальных интервалов // Сенсорные системы № 2. – С. 102-111.
- Цвикер Э., Фельдкеллер Р. 1967. Ухо как приемник информации. М.: Связь.
- Позин Н.В., Любинский И.А. и др. 1978. Элементы теории биологических анализаторов. М: Наука.
- Физиология сенсорных систем (под ред. Альтмана Я.А.). 2003. С.-П.: Паритет.
- Егорова М.А., Вартамян И.А., Эрет Г. 2002. Нейрофизиологические предпосылки слуховых критических полос на уровне среднего мозга // Сенсорные системы 2002, том 16 № 1. – С. 3-12.
- Хамори Й. 1985. Долгий путь к мозгу человека. М.: Мир.
- Бибииков Н.Г. 1987. Описание признаков звука нейронами слуховой системы наземных позвоночных. М.: Наука.
- Данилова Н.Н. 1998. Психофизиология. М.: Аспект Пресс.

Сведения об авторе:

Стефанович Маргарита Абовна.
Инженер по радиоизмерительной технике.
Независимый исследователь. С.-Петербург.
marg.stefanovich@yandex.ru